



### **Input Shaping** **Schwingungskompensation mit den** **Servoantriebsreglern CMMT-AS und CMMT-ST**

Kurzbeschreibung sowie Praxis-Beispiel zur Einstellung und Handhabung der Schwingungskompensation mit den Servoantriebsreglern CMMT-AS und CMMT-ST mit Hilfe der Festo Automation Suite (FAS)

CMMT

Titel .....Input Shaping - Schwingungskompensation mit den Servoantriebsreglern CMMT-AS / ST  
Version ..... 1.10  
Dokumentnummer ..... 100494  
Original ..... de  
Autor .....Festo  
Letztes Speicherdatum ..... 04.12.2023

## Urheberrechtshinweis

Diese Unterlagen sind geistiges Eigentum der Festo SE & Co. KG, der auch das ausschließliche Urheberrecht daran zusteht. Eine inhaltliche Änderung, die Vervielfältigung oder der Nachdruck dieser Unterlagen sowie deren Weitergabe an Dritte ist nur mit der ausdrücklichen Erlaubnis der Festo SE & Co. KG gestattet.

Festo SE & Co. KG behält sich das Recht vor, dieses Dokument vollständig oder teilweise zu ändern. Alle Marken- und Produktnamen sind Warenzeichen oder eingetragene Warenzeichen der jeweiligen Titelhälter.

## Rechtliche Hinweise

Hardware, Software, Betriebssysteme und Treiber dürfen nur für die beschriebenen Einsatzfälle und nur in Verbindung mit den von Festo SE & Co. KG empfohlenen Komponenten verwendet werden.

Festo SE & Co. KG lehnt jede Haftung für Schäden ab, die durch die Anwendung von allenfalls falschen bzw. unzureichenden Informationen oder aufgrund fehlender Informationen in diesen Unterlagen entstehen.

Defekte, die durch unsachgemäße Behandlung von Geräten und Baugruppen entstehen, sind von der Gewährleistung ausgeschlossen.

Sicherheitsrelevante Funktionen, im Sinne von Personen- und Maschinenschutz, dürfen mit Angaben und Informationen aus diesem Dokument nicht realisiert werden.

Für Folgeschäden, die durch einen Ausfall oder eine Funktionsstörung entstehen, wird dann jede Haftung abgelehnt. Im Übrigen gelten die Regelungen bzgl. Haftung aus den Liefer-, Zahlungs- und Softwarenutzungsbedingungen der Festo SE & Co. KG, welche Sie unter [www.festo.com](http://www.festo.com) finden, welche wir Ihnen aber auch auf Anforderung gerne zukommen lassen.

Alle in diesem Dokument angegebenen Daten sind keine zugesicherten Eigenschaften, insbesondere nicht für Funktionalität, Zustand oder Qualität im rechtlichen Sinn.

Die Informationen dieses Dokuments gelten nur als einfache Hinweise für die Umsetzung einer ganz bestimmten, hypothetischen Anwendung, keinesfalls als Ersatz für die Bedienungsanleitung der jeweiligen Hersteller sowie der Konstruktion und Prüfung jeweils eigenen Anwendung durch den Benutzer.

Die jeweiligen Bedienungsanleitungen der Festo Produkte sind unter [www.festo.com](http://www.festo.com) zu finden.

Der Benutzer dieses Dokuments (Funktion und Anwendung) muss selbst sicherstellen, dass jede Funktion die hier beschrieben ist, auch in seiner Applikation ordnungsgemäß funktioniert. Der Benutzer bleibt auch durch das Studium dieses Dokuments sowie der Nutzung der darin genannten Angaben weiterhin allein verantwortlich für die eigene Anwendung.

# Inhalt

<b>1.</b>	<b>Verwendete Software / Dokumentationen .....</b>	<b>4</b>
1.1	Dokumentationen.....	4
<b>2.</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>5</b>
1.1	Mechanische Achssysteme und Eigenfrequenz .....	5
1.2	Auswirkungen.....	5
1.3	Maßnahmen .....	5
<b>3.</b>	<b>Was ist “Input Shaping”? .....</b>	<b>6</b>
2.1	Wie funktioniert Input Shaping? .....	6
<b>4.</b>	<b>Bestimmung der Eigenfrequenz .....</b>	<b>8</b>
4.1	Aufzeichnung des Motor-Stroms mit der Festo Automation Suite .....	8
4.2	Erfassung mit einem externen Messsystem .....	8
4.3	Beschleunigungssensor .....	8
4.4	Messung mit einer akustischen Messeinrichtung.....	8
4.5	Verwendung einer Smartphone-App .....	8
4.6	Übernahme der Produkt-Parameter aus dem HGO .....	8
4.7	Manuelle Einstellungen .....	9
<b>5.</b>	<b>Einstellungen in der Festo Automation Suite.....</b>	<b>10</b>
<b>6.</b>	<b>Praktisches Beispiel .....</b>	<b>11</b>
<b>7.</b>	<b>Videos zu „Input Shaping“ .....</b>	<b>15</b>
<b>8.</b>	<b>Links.....</b>	<b>16</b>

## 1. Verwendete Software / Dokumentationen

Typ/Name	Version Software/Firmware	Teilnummer
Automation Suite	≥ V2.5.0.635	
CMMT-AS Plug-in	≥ V2.5.1.2	
CMMT-ST Plug-in	≥ V2.5.1.2	

[Festo Automation Suite und Plug-In](#)

### 1.1 Dokumentationen

Typ/Name	Version/Datum	Teilnummer
Handbuch CMMT-AS-SW-DE		8195472
Handbuch CMMT-ST-SW-DE		8195475

[Dokumentation Servoantriebsregler CMMT-AS](#)

[Dokumentation Servoantriebsregler CMMT-ST](#)

## 2. Einleitung

### 2.1 Mechanische Achssysteme und Eigenfrequenz

Mechanische Achssysteme zeichnen sich in aller Regel dadurch aus, dass bei einem Bewegungsvorgang verschiedene Bauteile zu Schwingungen angeregt werden. Ein Zahnriemen z. B. stellt solch ein Bauteil dar. Aber auch weitere Systemkomponenten wie Führungen, Lager, Spindeln, Getriebe, Maschinengestell, bewegte Massen/Aufbauten, etc. können das Schwingungsverhalten beeinflussen und in Abhängigkeit ihrer geometrischen und materiellen Eigenschaften mit einer oder mehreren Frequenzen schwingen. Diese Eigenfrequenzen sind umso höher, je geringer die Masse (und damit die Dämpfung) und je instabiler der Systemaufbau ist.

### 2.2 Auswirkungen

Bei der Beschleunigung oder Verzögerung einer Masse wird die Eigenfrequenz des Systems angeregt. Das kann für eine Automatisierungsaufgabe unterschiedliche Folgen haben:

- Verlängerte Positionierzeit, bis das gewünschte Positionierfenster erreicht ist bzw. die Schwingungen ein akzeptables Maß angenommen haben.
- Durch das Schwingen treten zusätzliche Belastungen in allen beweglichen Teilen auf (Lager, Führungen, Spindeln, Zahnriemen, Kupplungen, Getriebe, etc.). Dies führt in aller Regel zu einer Reduzierung der Lebensdauer.
- Erhöhter Energiebedarf.

### 2.3 Maßnahmen

Zur Vermeidung/Verringerung von Schwingungen können folgende Maßnahmen beitragen:

- Ruck (Jerk): eine Änderung des Ruck kann die Schwingungen zum Teil reduzieren. Doch oft ist dieser Wert aus mechanischen oder antriebstechnischen Gründen begrenzt, was zu einer Verlängerung der Positionierzeit führt.
- Notch-Filter: dieser Sperrfilter wird verwendet, wenn bestimmte Frequenzen (meist oberhalb von 200 Hz) das Antriebsverhalten störend beeinflussen und durch die Regelung nicht mehr unterdrückt werden können.
- Als weitere Maßnahme bieten unsere Antriebsregler die Möglichkeit, regelungstechnisch das Schwingungsverhalten zu verringern. Diese Funktion heißt **Input Shaping**.

### 3. Was ist "Input Shaping"?

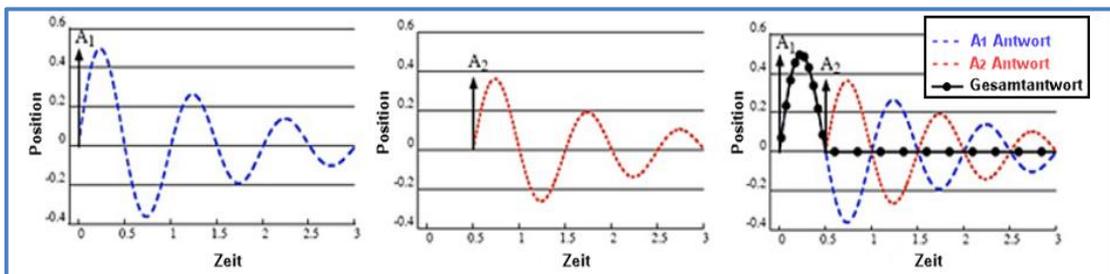
**Input Shaping** („Schwingungskompensation“ in der Festo Automation Suite) ist eine Steuerstrategie zur Kompensation von Eigenfrequenzen in mechanischen Systemen.

#### 3.1 Wie funktioniert Input Shaping?

Mithilfe von **Input Shaping** lässt sich ein beliebiges, zeitabhängiges Steuersignal (z.B. Positions-, Geschwindigkeits-, Beschleunigungs- oder Kraftsignal) so modifizieren, dass sich die angeregten Eigenschwingungen des Systems durch Überlagerung gegenseitig kompensieren.

Die Grundidee von **Input Shaping** ist es, die bereits angeregte Eigenschwingung des Systems durch das Anregen einer zweiten Schwingung so zu überlagern, dass sich beide Schwingungen in der Gesamtantwort des Systems gegenseitig auslöschen. Entscheidend hierfür ist die Auslegung der zweiten Impulsanregung hinsichtlich des zeitlichen Timings und der Amplitude.

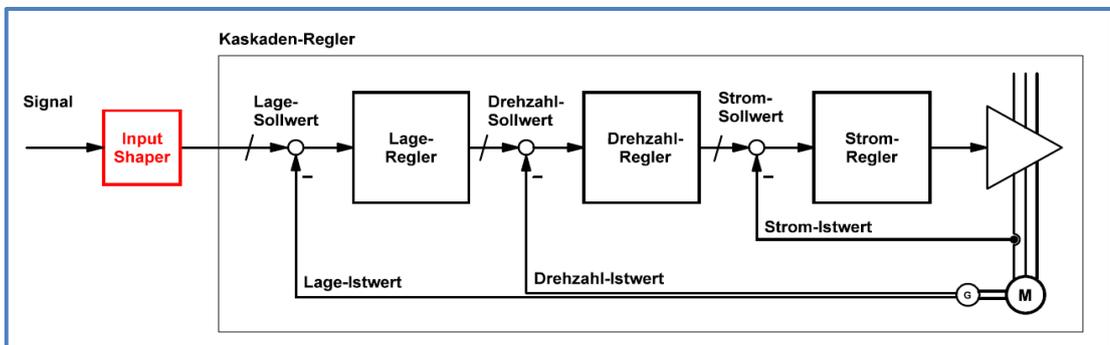
Die Amplituden und Zeitorte der Impulse werden aus den Eigenfrequenzen und Dämpfungsverhältnissen des Systems gewonnen.



**Achtung:** durch die Modifikation des Steuersignals ergibt sich eine höhere Positionierzeit! Diese kann eventuell durch höhere Werte für Beschleunigung und/oder Ruck ausgeglichen werden, muss aber auf jeden Fall experimentell ermittelt werden.

Der **Input Shaper** befindet sich außerhalb des Regelkreises und hat deshalb keinen Einfluss auf die Stabilität des Closed-Loop-Systems. Somit ist diese Funktion auch für unregelte (Schritt-) Motoren geeignet.

Die Formgebung kann sehr robust gegenüber Fehlern in den Systemparametern realisiert werden (ca.  $\pm 15\%$  Abweichung der Eigenfrequenz können noch  $>90\%$  der Schwingungen eliminieren).



Um die gewünschten Ergebnisse zu erzielen, muss dem **Input Shaper** die Eigenfrequenz des Systems mitgeteilt werden.

**Hinweis:**

Bei Mehrachssystemen treten sehr häufig unterschiedliche Eigenfrequenzen der Achsen auf, die sich zum Teil überlagern. Hier reicht oftmals die Kompensation der hauptanregenden Achse, um das System ausreichend zu stabilisieren.

**Abgrenzung:**

- Das **Input Shaping** funktioniert bei den CMMT-AS/ST-...-Controllern **nur** in der Betriebsart „Positionierbetrieb“
- Notchfilter (Sperr- oder Kerbfilter): diese Filterfunktion wirkt **im** Regelkreis und hat somit einen starken Einfluss auf die Auslegung des Reglers und die Stabilität der Regelung. Ein Notch-Filter sollte z. B. eingesetzt werden, falls eine bestimmte Drehzahl das Antriebssystem zu hochfrequenten Schwingungen im Stellsignal anregt, die durch die Drehzahlregelung nicht unterdrückt werden können.
- Auto-Tuning: es können Parameter für Positions- und Geschwindigkeitsregler ermittelt werden. Dazu muss der Stromregler bereits ausgelegt, geeignete Start-Parameter für Positions- und Geschwindigkeitsregler sowie die Amplitude des Anregungssignals vorliegen. Die Start-Parameter für Positions- und Geschwindigkeitsregler werden anhand der Antriebskonfiguration automatisch ermittelt. Eine einstellbare Anzahl von Messungen liefert die gewünschten Parameter. Eine Detektion von Störungen ist durch das Auto-Tuning **nicht** möglich.

## 4. Bestimmung der Eigenfrequenz

Damit das **Input Shaping** sinnvoll angewendet werden kann, muss die Eigenfrequenz des Systems bekannt sein. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, diese Resonanzfrequenz (meist in einem Bereich von  $> 2$  Hz und  $\leq 10$  Hz) eines mechanischen Systems zu ermitteln. Folgende Beispiele seien genannt:

### 4.1 Aufzeichnung des Motor-Stroms mit der Festo Automation Suite

Mithilfe der integrierten Trace-Funktion kann das Software-Tool **Festo Automation Suite** den Ist-Strom des Motors aufzeichnen. Siehe [Kapitel 6](#).

### 4.2 Erfassung mit einem externen Messsystem

Dazu wird ein geeignetes Messsystem direkt mit der bewegten Mechanik gekoppelt. Hier entsteht jedoch ein erhöhter Aufwand an mechanischen und elektrischen Installationsarbeiten.

### 4.3 Beschleunigungssensor

Diese Methode verwendet einen Sensor, welcher Beschleunigungen detektieren kann. Eine qualifizierte Aufbereitung der Daten kann Rückschlüsse auf das Resonanzverhalten einer Mechanik geben.

### 4.4 Messung mit einer akustischen Messeinrichtung

Spezielle Geräte ermitteln das Frequenzspektrum mit einem Mikrofon und einer aufwändigen Auswerte-Elektronik. Einem gelegentlichen Einsatz stehen jedoch hohe Anschaffungskosten gegenüber. Außerdem: hörbare Frequenzen liegen in aller Regel nicht im kritischen Spektrum aufgrund kleiner Amplituden und hohen Dämpfungen.

### 4.5 Verwendung einer Smartphone-App

Für die verschiedenen Smartphone-Betriebssysteme gibt es diverse Anwendungen. Diese sogenannten Frequenzspektrum-Analysatoren führen Schwingungsmessungen durch und können durchaus zufriedenstellende Ergebnisse liefern.

### 4.6 Übernahme der Produkt-Parameter aus dem HGO

Wird die Auslegung eines mechanischen Achssystems mit der Festo Auslegungssoftware **HGO** (Handling Guide Online) vorgenommen, so wird aus den bekannten Datenbankwerten der einzelnen Komponenten eine zu erwartende Resonanzfrequenz errechnet. Diese kann mit dem kompletten Parametersatz an die **Festo Automation Suite** zur Inbetriebnahme des Systems übergeben werden:

The screenshot displays the HGO interface. On the left, there is a 3D model of a mechanical system with a blue handle. Above the model, it says 'Ihre Handling-Lösung' and 'Ihr gewähltes System im Überblick:'. Below the model are several small icons representing different views or components. In the center, there is a 'Beispielhafte Darstellung' label. On the right, there is a panel with the following information:

- Ihre SystemID: **C2704005**
- Ihr nächster Schritt:
  - Preis anzeigen
  - Anfrage senden
  - In den Warenkorb legen

On the far right, there is a sidebar with various options:

- In den Warenkorb legen
- 2D/3D-CAD
- Dokumentation
- Datenblatt
- Inbetriebnahme-Datei** (highlighted with a red box)
- Anfrage senden

Below these options, it says 'Handling-Lösung: Standard System' and 'Ausgewählt: System # 1'.

At the bottom of the interface, it says '©2023 powered by CADENAS'.

**Achtung:** beim „EDGE“-Browser (Microsoft) ist standardmäßig der Popup-Blocker aktiviert. Zuerst deaktivieren, dann kann die Datei im Download-Verzeichnis gespeichert werden.

#### 4.7 Manuelle Einstellungen

Erfahrungsgemäß befinden sich die auftretenden Resonanzfrequenzen bei mechanischen Systemen innerhalb von wenigen Hertz ( $> 2$  Hz und  $\leq 10$  Hz) im sehr niederfrequenten Bereich. Durch Ausprobieren von mehreren Werten lässt sich in kurzer Zeit ein für die Verwendung des **Input Shaping** zufriedenstellender Parameter ermitteln.

## 5. Einstellungen in der Festo Automation Suite

Um das **Input Shaping** zu aktivieren, sind folgende Maßnahmen notwendig:

- Unter „PARAMETRIEREN/Parameterseiten“ die gewünschte Achse selektieren
- Den Eintrag „Schwingungskompensation“ wählen
- Werte für „Schwingungsfrequenz 1“ und/oder „Schwingungsfrequenz 2“ eingeben
- Die jeweilige Schwingungsunterdrückung aktivieren

The screenshot displays the 'PARAMETRIEREN' (Parameterization) window for a device (C4\_EMMS). The left sidebar shows a tree view with 'Schwingungskompensation' selected. The main area is divided into sections for filter configuration and vibration compensation.

Section	Parameter	Value	Unit	Status	
1. Sperrfilter	Filterfrequenz	3000,00	Hz	Deaktiviert	
	Bandbreite	10,00	Hz	Deaktiviert	
	Aktivierung	<input type="checkbox"/>	Aktiv	Deaktiviert	
	2. Sperrfilter	Filterfrequenz	3000,00	Hz	Deaktiviert
		Bandbreite	10,00	Hz	Deaktiviert
		Aktivierung	<input type="checkbox"/>	Aktiv	Deaktiviert
3. Sperrfilter	Filterfrequenz	3000,00	Hz	Deaktiviert	
	Bandbreite	10,00	Hz	Deaktiviert	
	Aktivierung	<input type="checkbox"/>	Aktiv	Deaktiviert	
Schwingungsfrequenz 1	Eigenfrequenz	3,39	Hz	Deaktiviert	
	Aktivierung Schwingungsunterdrückung	<input checked="" type="checkbox"/>	Aktiv	Aktiviert	
Schwingungsfrequenz 2	Eigenfrequenz	3,70	Hz	Deaktiviert	
	Aktivierung Schwingungsunterdrückung	<input type="checkbox"/>	Aktiv	Deaktiviert	

## 6. Praktisches Beispiel

Ein Versuchsaufbau soll zeigen, wie und mit welchem Aufwand die Eigenfrequenz einer Achsmechanik mit Hilfe der **Festo Automation Suite** bestimmt werden kann. Hier die verwendeten Komponenten und Applikationsparameter:

### Hardware:

CMMT-AS-C4-3A-PN-S1

EMMS-AS-70-M-LS-RM

EGC-80-960-TB-KF-OH-GK

### Applikationsdaten:

Bewegte Masse	10 kg
Geschwindigkeit	0,7 m/s
Beschleunigung	1 m/s <sup>2</sup>
Verzögerung	5 m/s <sup>2</sup>
Ruck	500 m/s <sup>3</sup>

### Trace-Konfiguration:

Unter "DIAGNOSE/Traceeinstellungen" können verschiedene Aufzeichnungskanäle als auch eine gewünschte Aufzeichnungsdauer parametrisiert werden.

The screenshot shows the 'DIAGNOSE' tab in the Festo Automation Suite. The 'Traceeinstellungen' (Trace Settings) window is active, displaying a table of recording channels:

ID	Aktiv	ID	Signal
0	<input checked="" type="checkbox"/>	P1.90.0.0	Sollwert Position
1	<input checked="" type="checkbox"/>	P1.128.0.0	Istwert Position Geberkanal 1
2	<input checked="" type="checkbox"/>	P1.2216.0.0	Sollwert Geschwindigkeitsregler
3	<input checked="" type="checkbox"/>	P1.1210.0.0	Istwert Geschwindigkeit Geberkanal 1
4	<input checked="" type="checkbox"/>	P1.86.0.0	Sollwert Wirkstrom
5	<input checked="" type="checkbox"/>	P1.814.0.0	Istwert Wirkstrom
6	<input checked="" type="checkbox"/>	P1.2217.0.0	Regelfehler Position

Below the table, the 'Aufzeichnungseinstellungen' (Recording Settings) are visible:

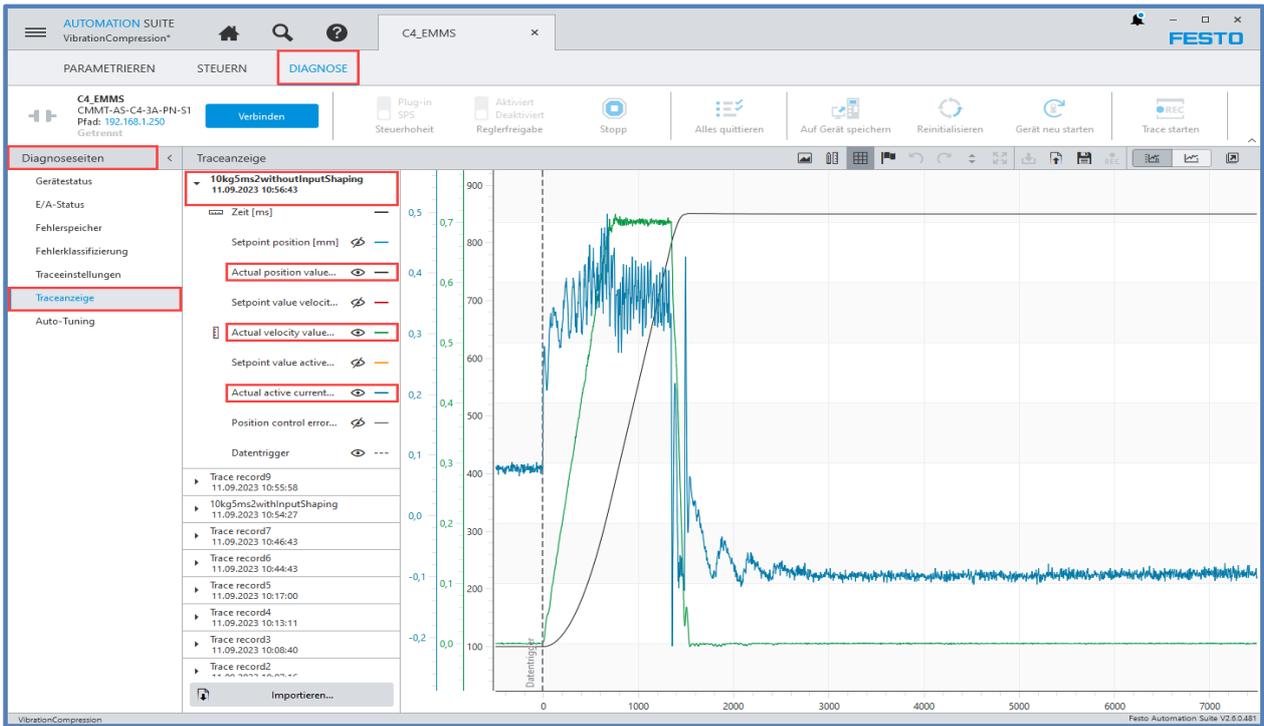
Aufzeichnungsdauer	8,002125 s
Auflösung	0,003375 s

The 'Neuer Aufzeichnungskanal' dialog box is open, showing a search bar and a list of categories:

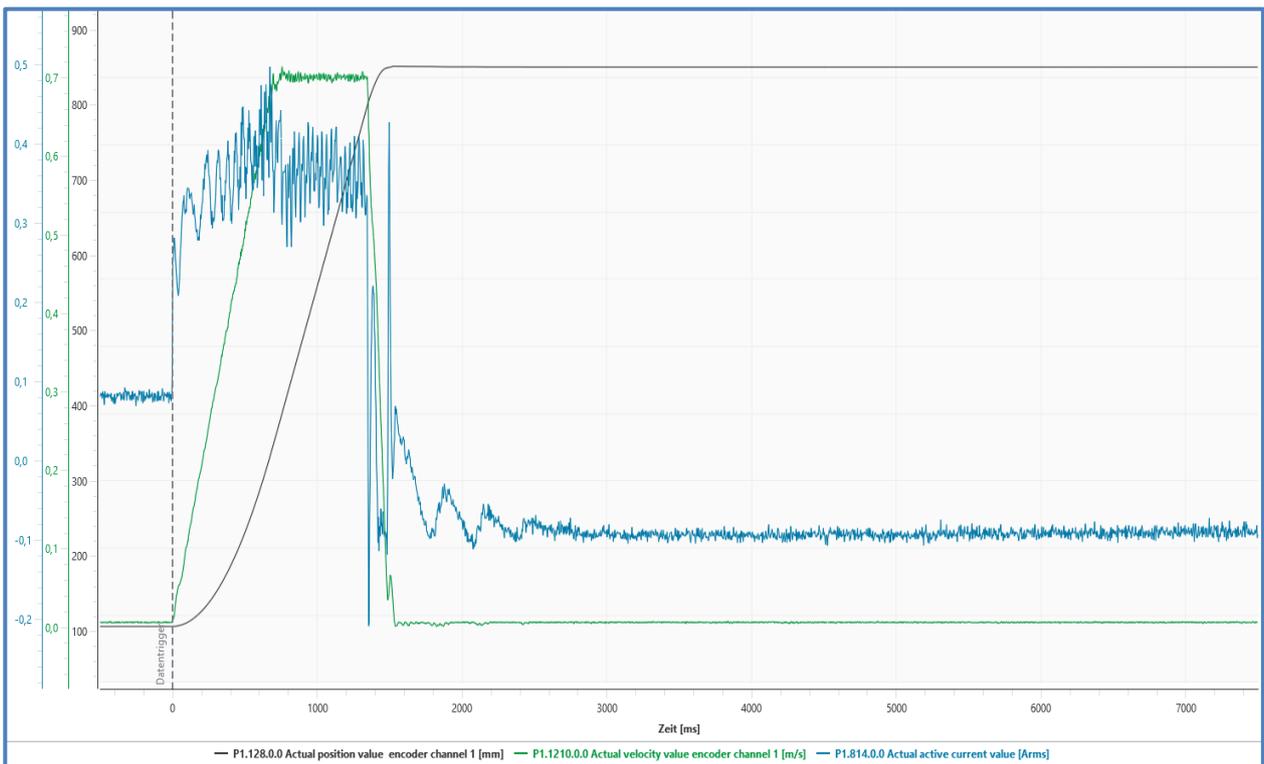
- Häufig verwendet
- Antriebskonfiguration
- Geräteeinstellungen
- Feldbus
- Digitale E/A
- Analoge E/A
- Geberchnittstelle
- Achse 1
- Parameterliste

Die Seite "DIAGNOSE/Traceanzeige" bietet nach Auswahl eines bestimmten Trace die gewünschten Aufzeichnungskanäle zur Ansicht an.

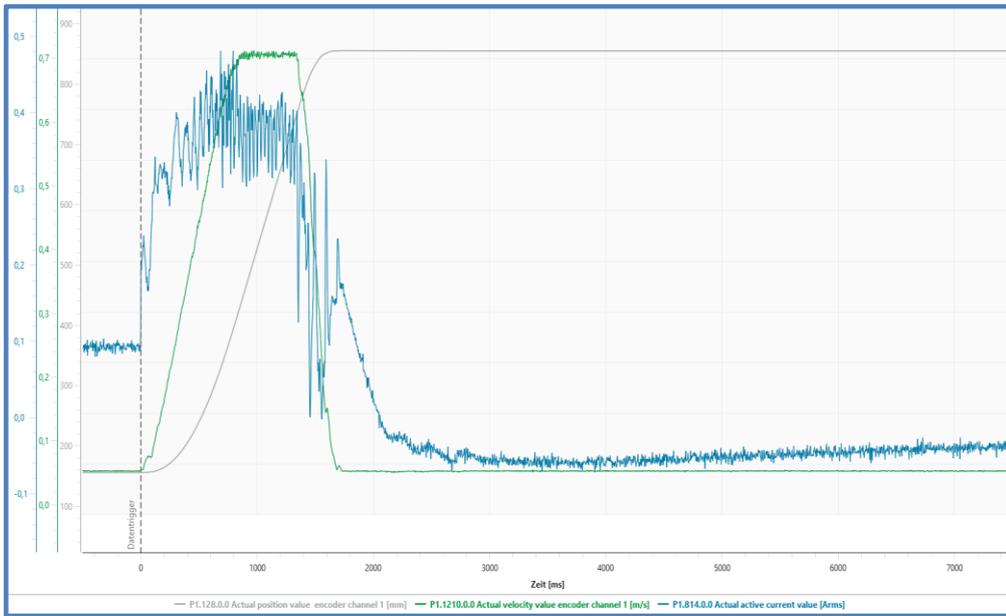
# Praktisches Beispiel



## Trace ohne Input Shaping

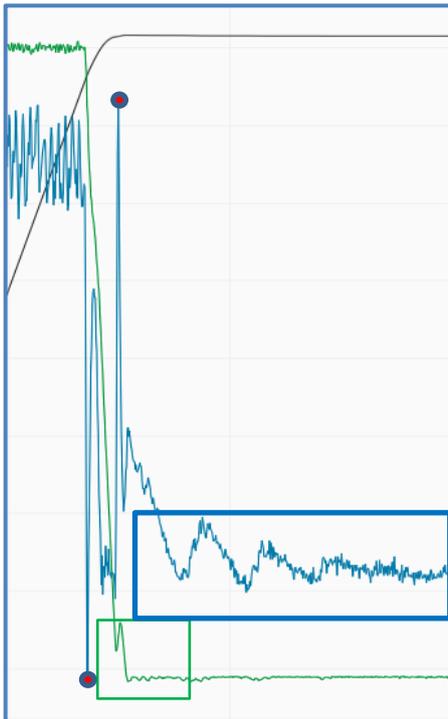


**Trace mit Input Shaping**



Bitte beachten, dass Beschleunigung ( $1\text{m/s}^2$ ) und Verzögerung ( $5\text{m/s}^2$ ) diese Grafik stark beeinflussen.

**Ohne Input Shaping**



**Mit Input Shaping**



Der Vergleich ohne/mit **Input Shaping** wird in der Vergrößerung deutlich. Mit Input Shaping:

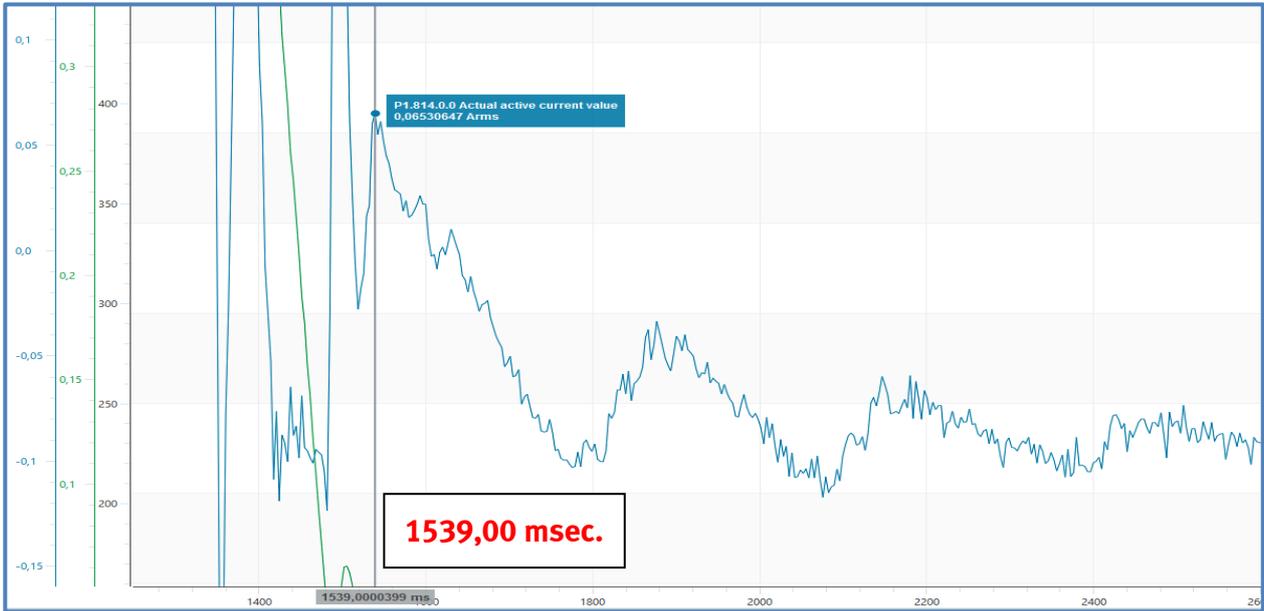
 Die Stromspitzen sind deutlich niedriger

 Der Geschwindigkeitsverlauf ist viel ruhiger (ausgeglichener)

 Das Stromsignal weist weniger Spitzen auf, der Stromwert ist geringer

Aus dem Trace ohne Input Shaping wurde die Eigenfrequenz ermittelt:

Erste Spitze ausmessen:



Nächste Spitze ausmessen, hier Spitze 4:



Berechnung der Eigenfrequenz: 
$$\left( \frac{1}{\frac{\text{Zeitmax} - \text{Zeitmin}}{\text{Anzahlspitzen}}} \right) * 1000$$

Für dieses Beispiel: 
$$\left( \frac{1}{\left( \frac{2423,25 - 1539,00}{3} \right)} \right) * 1000 = 3,39 \text{ Hz}$$

Den Wert von **3,39** Hz in der **Festo Automation Suite** eintragen. Kleine Korrekturen nach oben oder unten können noch Verbesserungen bewirken.

## 7. Videos zu „Input Shaping“

[Input Shaping.mp4](#)

[Without\\_With Input Shaping.mp4](#)

## 8. Links

[Festo Automation Suite + Plug-in DE](#)



[Festo Automation Suite + plug-in EN](#)



[Dokumentation CMMT-AS DE](#)



[Documentation CMMT-AS EN](#)



[Dokumentation CMMT-ST DE](#)



[Documentation CMMT-ST EN](#)

